

УДК 621.382.2

## ВОЛЬТАМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГЕНЕРАЦИИ ДИОДОВ С ТУННЕЛЬНЫМИ ГРАНИЦАМИ НА ОСНОВЕ GaAs

Э. Д. Прохоров, О. В. Боцула, О. А. Клименко

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,  
4, пл. Свободы, Харьков, 61077, Украина, Тел. (0572) 7051262

Поступила в редакцию 5 сентября 2010 года

Исследуются вольтамперные характеристики и эффективность генерации диодов с туннельными границами в структурах типа «сендвич» на основе GaAs. Показано, как влияют сопротивление между контактами диодной структуры и сопротивление, включенное последовательно с туннельной границей, на вольтамперную характеристику диода, общее сопротивление структуры, отрицательную дифференциальную проводимость структуры. Определены эффективности генерации диодов с туннельными границами в зависимости от параметров диодов. Показано как эффективность генерации изменяется с увеличением частоты. Оценен частотный предел работы диодов с туннельными границами.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** GaAs-диод с туннельной границей, вольтамперные характеристики, эффективность генерации.

Досліджуються вольтамперні характеристики та ефективність генерації діодів з тунельними межами в структурах типу «сендвіч» на основі GaAs. Показано, як впливають опори між контактами діодної структури і опори, включені послідовно з тунельною межею, на вольтамперну характеристику діода, загальний опір структури, негативну диференціальну провідність структури. Визначено ефективності генерації діодів з тунельними межами в залежності від параметрів діодів. Показано як ефективність генерації змінюється зі збільшенням частоти. Оцінено частотна межа роботи діодів з тунельними межами.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** GaAs-діоди з тунельною межею, вольтамперні характеристики, ефективність генерації.

Investigate the current-voltage characteristics and the generation efficiency diodes with tunnel boundaries in structures of the "sandwich" based on GaAs. Shows the effect of resistance between the contacts of the diode structure and the resistance in series with the tunnel boundary, the current-voltage characteristic of the diode, the total resistance of the structure, negative differential conductance of the structure. Determined by the efficiency of generating diodes with tunnel boundaries, depending on the parameters of the diodes. It is shown how the efficiency of generation varies with frequency. Estimated frequency limit of the diode with the tunnel boundaries.

**KEYWORDS:** GaAs-diodes with a tunneling boundary, current-voltage characteristics, efficiency of generation.

Исследуются диоды, в которых при определенных напряжениях между омическими контактами возникает отрицательная дифференциальная проводимость (ОДП) за счет тунелирования или резонансного тунелирования электронов через боковые границы диода, определяются их вольтамперные характеристики и их зависимости от параметров структур. Принципы работы таких диодов описаны в работах [1,2,3]. Конфигурации диодов довольно сложные, распределения электрических полей и токов в структурах двумерные. Это осложняет точное описание, как параметров диодов, так и их вольтамперных и частотных характеристик.

### ДИОД С ТУННЕЛЬНОЙ ГРАНИЦЕЙ P<sup>+</sup>-N<sup>+</sup> НА GAAS N-ТИПА

Рассмотрим принцип работы диода в планарной и «сендвич» структурах (рис.1). Между анодом и катодом протекает ток  $I_{A-K}$ . Напряжение между катодом и анодом таково, что туннельный  $n^+-p^+$  переход (переход резкий с толщиной 100 -150 Å, в котором туннельная составляющая тока намного больше диффузионно-дрейфовой составляющей) включен в прямом направлении. Суммарный ток через  $n^+-p^+$  переход –  $I_{ТГ}$ . При увеличении напряжения на диоде  $U$  токи  $I_{ТГ}$  и  $I_{A-K}$  растут до тех пор, пока ток туннельной границы не достигнет максимального значения. При дальнейшем увеличении напряжения ток туннельной границы (ТГ) резко уменьшается, что приводит к уменьшению тока между катодом и анодом диода. При последующем увеличении напряжения  $U$  ток  $I_{ТГ}$  и ток  $I_{A-K}$  возрастают. Таким образом, диод катод-анод  $n^+-n-p^+$  с боковыми границами в виде  $n^+-p^+$  перехода обладает отрицательной дифференциальной проводимостью (ОДП) [1, 2, 3].

Планарная структура двумерна, поэтому для определения распределения электрического поля в структуре, токов в структуре и интегральных характеристик необходимо решать двумерную задачу (рис. 1). Далее рассматривается структура типа «сендвич» как более простая для анализа ВАХ и эффективности генерации диодов с ТГ.

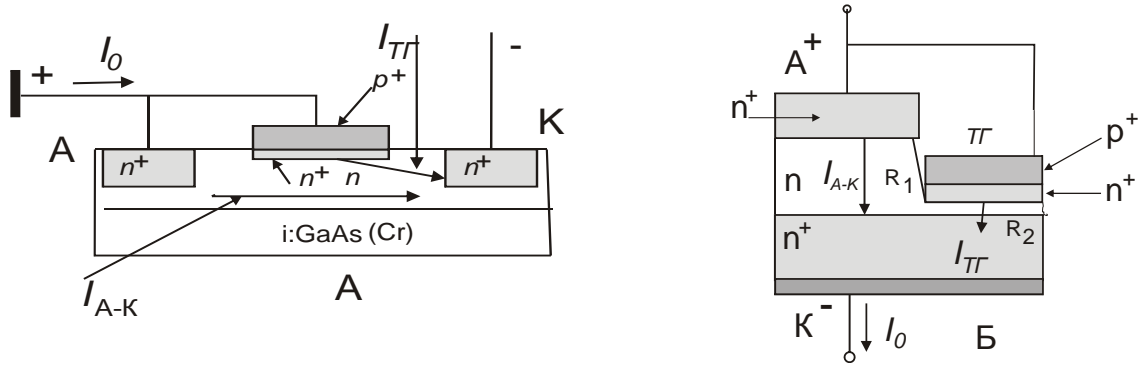


Рис. 1. Планарная структура диода с боковой  $p^+-n^+$  ТГ на эпитаксиальной пленке  $n$ -GaAs, выращенной на полуизолирующей подложке (А), и структура типа «сэндвич» на сильнолегированной подложке  $n^+$ -GaAs (Б) при прямом включении ТГ.

В первом приближении можно не учитывать различие токов вдоль границы туннельного перехода и считать полный ток через переход равным  $I_{TG}$ . Таким образом, общий ток через диод  $I_0(U)$  в одномерном приближении состоит из тока через туннельную  $I_{TG}(U)$  границу и тока через промежуток анод-катод  $I_{A-K}(U)$ :

$$I_0(U) = I_{TA}(U) + I_{A-K}(U) \quad (1)$$

где  $U$  – приложенное к диоду напряжение. Выражение (1) определяет вольтамперную характеристику (ВАХ) диода. Рассмотрим составляющие тока диода.

Ток  $I_{A-K}(U)$  определяется через параметры материала  $n$ -области и приложенное напряжение:

$$I_{A-K} = \frac{en\mu_n(\dot{A})S}{l} \cdot U \quad (2)$$

где  $n$ ,  $S$  – концентрация электронов в  $n$ -области и площадь между катодом и анодом,  $\mu_n$  – подвижность электронов в  $n$ -области,  $l$  – расстояние между катодом и анодом. И в планарной структуре и в структуре типа «сэндвич» выражения (1), (2) приближенно отражают действительный ток между анодом и катодом.

Ток  $I_{TA}(U)$  представляет собой туннельный ток  $p^+-n^+$  перехода, который может быть записан в виде [4, 5]:

$$I_{TA}(U) = A' \int_0^{F_n + F_p - eU} [f_n(\varepsilon) - f_p(\varepsilon)] \times (F_n + F_p - eU - \varepsilon)^{\frac{1}{2}} \varepsilon^{\frac{1}{2}} d\varepsilon \quad (3)$$

где  $F_n, F_p$  – уровни Ферми в  $p^+$ - и  $n^+$ -областях,  $f_n(\varepsilon), f_p(\varepsilon)$  – функции Ферми-Дирака равные

$$f_n(\varepsilon) = (\exp \frac{\varepsilon - F_n \pm eU}{kT} + 1)^{-1}, \quad f_p(\varepsilon) = (\exp \frac{\varepsilon - F_p}{kT} + 1)^{-1}, \quad (4)$$

$A'$  – постоянная, включающая в себя коэффициент прозрачности барьера и эффективные массы электронов и дырок ( $m_e, m_h$ ).

Ток  $I_{TA}(U)$  может быть записан и в виде следующей аппроксимации [6]:

$$I_{TA}(U) = I_{\max} \frac{U}{U_{\max}} \exp(1 - \frac{U}{U_{\max}}) + I_{\min} \exp(A(U - U_{\max})) + I_s \exp(b \frac{eU}{kT} - 1), \quad (5)$$

где  $I_{\max}$  – максимальный туннельный ток через диод при напряжении  $U_{\max}$ ,  $I_{\min}$  – минимальный ток через диод при напряжении  $U_{\min}$ ,  $A$  – постоянная, характерная для конкретного полупроводникового материала,  $b$  – показатель роста диффузионного тока через переход,  $I_s$  – ток насыщения туннельного перехода без учета туннелирования.. Отношение  $I_{\max} / I_{\min}$  может меняться от единиц до 30-40 для

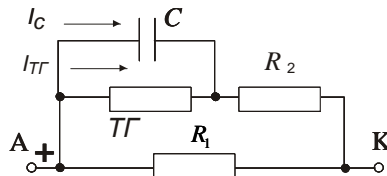


Рис. 2. Эквивалентная схема диода с боковой  $p^+-n^+$  ТГ.

GaAs.

Для оценки вольтамперных характеристик рассматриваемых структур можно воспользоваться представлением структуры типа «сэндвич» в виде эквивалентной схемы с сосредоточенными параметрами. Приближенная эквивалентная схема такой структуры показана на рис. 2. Здесь ТГ – сопротивление ТГ,  $C$  – емкость ТГ,  $R_2$  – сопротивление включенное последовательно с ТГ и состоящее из сопротивления потерь  $R_s$  и сопротивления между ТГ и катодом,  $R_1$  – сопротивление канала между анодом и катодом, включенное параллельно ТГ, емкость А-К намного меньше емкости ТГ ( $l \gg l_1$  – расстояние между ТГ и катодом).

Вольтамперная характеристика диода (ВАХ) на постоянном токе и напряжении следует из эквивалентной схемы (рис. 2):

$$I_{\text{д\ddot{a}}} = I_{\text{д\ddot{a}}}(U - I_{\text{д\ddot{a}}}R_2), \quad I(U) = I_{\text{д\ddot{a}}} + U/R_1 \quad (6)$$

где  $I_{\text{д\ddot{a}}}(U)$  известная зависимость тока через ТГ от напряжения на ТГ (5). Решая это трансцендентное уравнение можно определить ВАХ диода с ТГ в зависимости от параметров ТГ и параметров всей структуры  $R_1$  и  $R_2$ .

Определялась также эффективность генерации в зависимости от параметров диода с ТГ. В режиме генерации в одноконтурном резонаторе на диоде действует напряжение  $U(t) = U_0 + U_1 \sin \omega t$  при  $U_0 > U_{\text{max}}$  при условии  $U_0 - U_1 > 0,5U_{\text{max}}$ . Рабочая точка в течение периода колебаний перемещается по зависимости  $I(U)$ . Ток через диод разлагается в ряд Фурье. Для определения эффективности генерации на первой гармонике необходимо определить постоянную составляющую тока и амплитуду первой гармоники:

$$I(U_0) = \frac{1}{T} \int_0^T I(U(t)) dt, \quad I_1 = \frac{2}{T} \int_0^T I(U(t)) \sin \omega t dt. \quad (7)$$

Для получения максимального значения эффективности генерации для задаваемого поля  $U_0$  амплитуда первой гармоники  $U_1$  оптимизируется (находится такая амплитуда первой гармоники, при которой коэффициент полезного действия КПД максимален). КПД определяется в виде:

$$\hat{E} \hat{I} \hat{A} = \frac{1}{2} \frac{I_1 U_1}{I(U_0) U_0} \cdot 100\% \quad (8)$$

Таким образом определяется максимальная эффективность генерации на конкретной частоте  $f$ . Следует отметить, что в данном анализе не учитывается инерционность туннельного механизма проводимости, поскольку времена переноса электронов через потенциальный барьер  $\sim 10^{-15}$  с, что намного меньше периода рассматриваемых частот.

Численные расчеты ВАХ диодов с ТГ при прямом смещении проводились при следующие параметрах: материал GaAs,  $n = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ,  $\mu_n = 7000 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ , площадь анодного контакта  $S_f = 10^{-6} \text{ см}^2$  (диаметр 10 мкм),  $l$  – расстояние между катодом и анодом, которое считалось переменным (при  $l = 10^{-4} \text{ см}$ , сопротивление при указанных параметрах  $R_1 \approx 10 \text{ Ом}$ ),  $I_{\text{max}} = 0,2 \text{ А}$ ,  $U_{\text{max}} = 0,1 \text{ В}$ ,  $I_s = 10^{-6} \text{ А}$ ,  $b = 0,3$ . Сопротивление  $R_2$  при  $l_1 = 10^{-5} \text{ см}$  и  $S_2 = 10^{-6} \text{ см}^2$  не превышает 1 Ома, его можно менять изменяя  $l_1$ . Емкость  $C < 1 \text{ пФ}$  ( $C = \varepsilon \varepsilon_0 S/L$ , где  $L$  – толщина ТГ менее  $10^{-6} \text{ см}$ ) включена параллельно проводимости ТГ, при расчетах ВАХ на постоянном токе и напряжении она не учитывалась. ОДП диода определялась по ВАХ.

Из анализа ВАХ, показанных на рис. 3, 4, при прямом смещении ТГ следует:

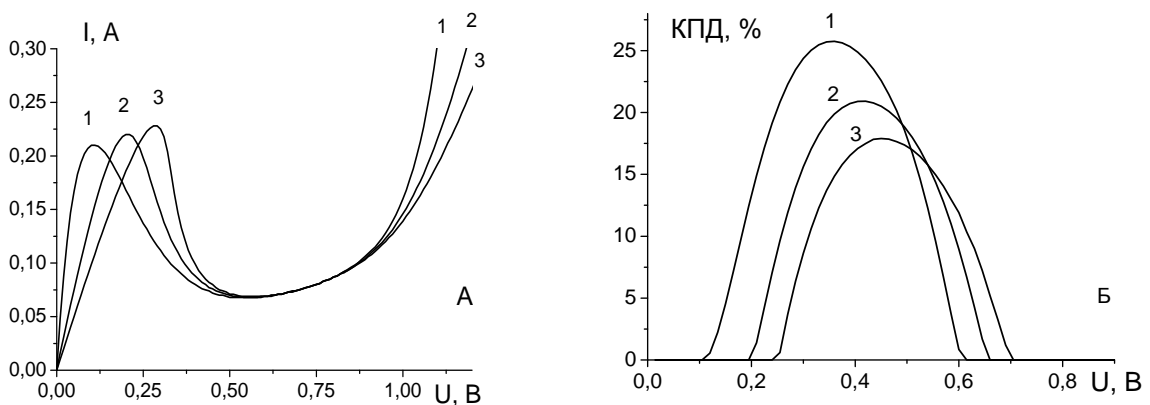


Рис.3. Вольтамперные характеристики (А) и эффективность генерации (Б): при прямом включении диода с ТГ при  $R_1 = 10 \text{ Ом}$  и различных  $R_2$ : 1 – 0,01 Ом, 2 – 0,5 Ом, 3 – 0,9 Ом.

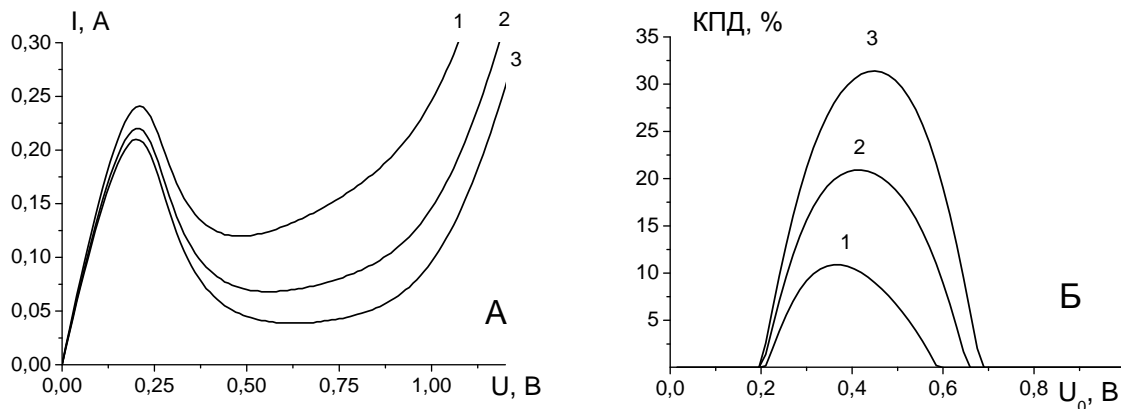


Рис.4. Вольтамперные характеристики (А) и эффективность генерации (Б): при прямом включении диода с ТГ при  $R_2=0,5$  Ом и различных  $R_1$ : 1 – 5 Ом, 2 – 10 Ом, 3 – 20 Ом.

1. При увеличении последовательно включенного с ТГ сопротивления  $R_2$  увеличиваются  $I_{\max}$ ,  $U_{\max}$ , увеличивается ОДП (при  $R_2 = 0.05$  Ом  $G=-0,6$  См, при  $R_2 = 0.9$  Ом  $G=-2,0$  См);
2. При увеличении сопротивления  $R_2$  уменьшается эффективность генерации (КПД) с 25% при  $R_2 = 0.01$  Ом до 18% при  $R_2 = 0.9$  Ом;
3. Увеличение сопротивления  $R_1$  при неизменном сопротивлении  $R_2$  приводит к уменьшению  $I_{\max}$ ,  $I_{\min}$ , увеличению их отношению и увеличению КПД до 32% при  $R_1 = 20$  Ом. (рис.4).
4.  $I_{\min}$  уменьшается с увеличением  $R_1$  и при этом слабо зависит от  $R_2$ ,  $U_{\max}$  возрастает при увеличении  $R_2$  и почти не зависит от  $R_1$ .
5. Диапазон генерации по напряжению изменяется от 0,2 В до 0,7 В, при этом максимум КПД приходится примерно на напряжения 0.36...0.45 В.

Таким образом, рассматриваемый диод с ТГ обладает высоким КПД при рассеиваемых мощностях десятки милливольт (при указанных выше параметрах 20-200 мВт) и полезной мощности в единицы милливольт (5-50 мВт). Приведенные значения КПД справедливы на частотах, когда емкостное сопротивление велико по сравнению с активным сопротивлением ТГ.

#### ЧАСТОТНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ВАХ И КПД

С увеличением частоты начнет проявляться шунтирующее действие емкости, включенной параллельно проводимости ТГ. Это приведет к уменьшению эффективности генерации вплоть до её исчезновения. Проведенные ранее исследования импедансных характеристик диодов с ТГ показали, что на определенных частотах активная составляющая импеданса диода стремится к нулю [7]. На частотах ниже этой частоты возможна генерация, на частотах выше - поглощение. И в этом процессе основную роль играет емкость ТГ. Для учета влияния емкости введем емкостное сопротивление  $Z_C = 1/\omega C$ , которое включено параллельно активной проводимости ТГ и которое будет шунтировать ТГ. На низких частотах  $Z_C \gg R_{\text{дн}}$  и оно не влияет на ВАХ и КПД диода с ТГ. С увеличением частоты через сопротивление  $R_2$  будет протекать не только ток проводимости ТГ, но ток через емкостное сопротивление (рис. 2). Тогда ток  $I_2$ , протекающий через сопротивление  $R_2$ , определяется из трансцендентного уравнения:

$$I_2 = \frac{U - I_2 R_2}{Z_C} + I_{\text{дн}}(U - I_2 R_2). \quad (9)$$

Уравнение для ВАХ диода с ТГ запишется в виде:

$$I(U) = I_2(U) + \frac{U}{R_1} \quad (10)$$

Решая уравнение (9-10) получаем частотные зависимости ВАХ и рассчитанные по этим зависимостям КПД (f). Для параметров диода с ТГ, приведенных выше, зависимости показаны на рис. 5. Из анализа зависимостей следует, что при уменьшении емкостного сопротивления возрастают  $I_{\max}$ ,  $U_{\max}$ ,  $I_{\min}$ , а  $U_{\min}$  уменьшается, что обусловлено увеличением шунтирующего влияния емкости ТГ; уменьшается разница напряжений  $U_{\min} - U_{\max}$  вплоть до нуля, в результате чего КПД на определенной частоте стремится к нулю (рис.5). При указанных выше параметрах диода с ТГ максимальная частота

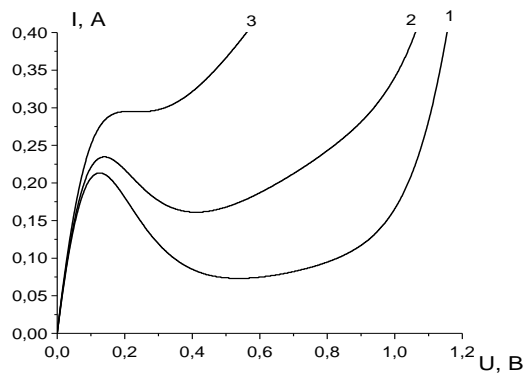


Рис. 5. Зависимости тока через диод с ТГ от напряжения на диоде на различных частотах: 1 – 2 ГГц, 2 – 40 ГГц, 3 – 120 ГГц.

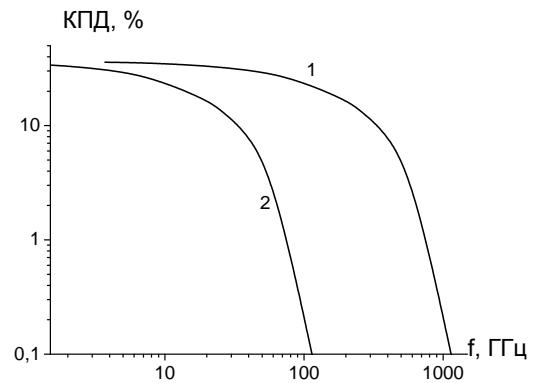


Рис. 6. Зависимость эффективности генерации от частоты диода с ТГ при емкостях туннельной границы: 1 – 0,1 пФ, 2 – 1 пФ.

генерации составляет порядка 120 ГГц, по импедансным зависимостям максимальная частота составляет ~200 ГГц.

Для увеличения частоты генерации необходимо уменьшение размеров диода с ТГ. Можно уменьшать площади контактов между катодом и анодом порознь или одновременно, можно уменьшать толщины, определяющие сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  порознь или одновременно, можно менять параметры полупроводникового материала.

Рассмотрим диод с меньшими площадями контактов на основе материала GaAs с  $n = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ,  $\mu_n = 7000 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ . Площадь анодного контакта  $S_1 = 10^{-7} \text{ см}^2$  (диаметр 3 мкм),  $l = 10^{-5} \text{ см}$ , сопротивление  $R_1 \approx 10 \text{ Ом}$ , сопротивление  $R_2$  при  $l_1 = 10^{-6} \text{ см}$  и  $S_2 = 10^{-7} \text{ см}^2$  составляет менее 1 Ома,  $I_{\text{max}} = 0,02 \text{ А}$ ,  $U_{\text{max}} = 0,1 \text{ В}$ ,  $I_s = 10^{-7} \text{ А}$ ,  $b = 0,3$ . Емкость  $C < 0,1 \text{ пФ}$ . Рассеиваемая мощность 2-20 мВт, полезная 0,2-6 мВт. Частота, на которой ВАХ не имеет участка ОДП и КПД равен нулю, составляет ~ 1000 ГГц.

### ВЫВОДЫ

Показано, что вольтамперные характеристики диодов с ТГ в структуре типа «сэндвич» обладают отрицательной дифференциальной проводимостью, зависящей от сопротивлений, включенных последовательно и параллельно ТГ. Последовательно включенное сопротивление должно быть намного меньше параллельно включенного сопротивления.

Показано, что параметры диода с ТГ определяют диапазон генерации по напряжению и максимальные значения КПД в этом диапазоне, максимальные значения КПД на низких частотах составляют 26-32 % при рассеиваемых мощностях до 200 мВт.

Максимальные частоты генерации при микроразмерах структуры (площади  $10^{-7} \dots 10^{-6} \text{ см}^2$ ) находятся в коротковолновой части мм-диапазона и длинноволновой части субмиллиметрового диапазонов (120...1000 ГГц).

Планарные структуры диодов с ТГ, нуждающиеся в двумерном анализе, требуют отдельного рассмотрения. Кроме того, при напряженностях электрического поля между катодом и анодом более 1 кВ/см необходимо учитывать зависимость подвижности от напряженности электрического поля и междолинный перенос электронов, который может приводить к неустойчивостям тока в GaAs

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прохоров Э.Д., Боцула О.В. Отрицательная дифференциальная проводимость полупроводникового диода с туннельными боковыми гранями // Радиофизика и электроника. – 2010. – Т. 15, № 2. – С. 109-113.
2. Prokhorov E. D., Botsula O. V. Negative differential conductivity semiconductor diode with resonance border // Proc. 6 Int. symp. "Physics and engineering of MM and SubMM waves – Kharkov, 2010, section D, D-13.
3. Прохоров Э.Д., Боцула О.В. ОДП диода с туннельными и резонансно-туннельными границами, Материалы 20 Межд. Крымской конф.- " СВЧ техника и телекоммуникационные технологии".- Севастополь, 2010, т.1.- С. 218-219.
4. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: в 2 т. Т. 2. - М.: Мир, 1984. - 456 с.
5. Esaki L. New Phenomenon in Narrow Germanium p-n junction // Phys.Rev.- 1958.-109. - P. 603-605.
6. Прохоров Э.Д. Твердотельная электроника.-Х: ХНУ им. В.Н. Каразина, 2008.-544 с.
7. Прохоров Э.Д., Боцула О.В., Клименко О.А. Импедансные характеристики диодов с туннельными и резонансно-туннельными границами // Радиофизика и электроника, – 2011.— Т. 16, №1.